

UNTERSUCHUNG DER INSTATIONÄREN STRÖMUNGS- STRUKTUREN AM EINSEITIG BEGRENZTEN KREISZYLINDERSTUMPF

ON THE UNSTEADY FLOW STRUCTURES IN THE WAKE OF A ONE SIDE BOUNDED, FINITE HIGH CIRCULAR CYLINDER

Mario Jensch, Martin Brede, Frank Hüttmann, Ulf Grebin, Konstantin Bunse und Alfred Leder

Universität Rostock,
Lehrstuhl Strömungsmechanik,
Albert-Einstein-Strasse 2,
18059 Rostock

**Umströmung stumpfer Körper, Abgelöste Strömung, Phasenaufgelöste LDA
Bluff body wake, separated flow, phase averaged LDA**

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die instationäre Umströmung eines einseitig begrenzten Kreiszyylinderstumpfs bei einer Reynoldszahl von 200000 bezogen auf den Zylinderdurchmesser experimentell untersucht. Für das Erfassen der Geschwindigkeitsverteilung in einem Volumen im Nachlauf wird die phasenaufgelöste drei Komponenten Laser Doppler Anemometrie (3C LDA) benutzt. Der Triggermechanismus wird auf die Phase der Primärwirbelstrasse angewendet, wobei die Phasenlage jeder gemessenen Geschwindigkeitsinformation durch ein Hitzdrahtanemometer bestimmt wird. Der zeitliche Verlauf wird in 16 Phasenwinkel eingeteilt, über die anschließend eine Phasenmittelung durchgeführt wird. Die Topologie der Wirbelstrukturen wird über das λ_2 Wirbelkriterium (Jeong & Hussain [1995]) und instantane Stromlinien veranschaulicht.

Einleitung

Die Umströmung von Zylindern mit kleinem Längen- Durchmesser Verhältnis wird seit mehreren Jahren experimentell und numerisch untersucht. Das Interesse liegt in den komplexen, dreidimensionalen und instationären Strömungsstrukturen begründet, welche sich aufgrund von Scherschichtinstabilitäten und Ablösephänomene bilden. Ähnliche Strömungsstrukturen treten in der Natur und Technik, wie zum Beispiel bei der Automobil- oder Gebäudeumströmung auf. Dennoch ist die Zahl der Veröffentlichungen, die darüber hinaus meist nur stationäre Ergebnisse beinhalten, sehr begrenzt. Pattenden et al. [2005] gibt einen detaillierten Überblick bereits untersuchter Konfigurationen. In Oschatz et al. [2002], Leder [2003], Richter & Leder [2005] und Jensch et al. [2006, 2007] wurden bereits zeitlich gemittelte Ergebnisse aus LDA und TR-PIV Messungen an einem einseitig begrenzten Kreiszyylinderstumpf mit einem Längen- Durchmesser Verhältnis von zwei diskutiert.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 werden verschiedene Messtechniken, wie die zeitlich hoch auflösende Stereo Particle Image Velocimetry, Druckmesstechniken und die phasenaufgelöste Laser Doppler Anemometrie, angewendet. Die gewon-

nen Daten sollen Aufschluss über die zeitliche Dynamik der komplexen instationären Strömungsphänomene liefern.

Experimenteller Aufbau

Objekt der Untersuchungen ist ein einseitig begrenzter Kreiszyylinderstumpf mit einem Längen- Durchmesser Verhältnis von zwei. Die Untersuchungen wurden in einem Windkanal Göttinger Bauart mit einer $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ offenen Messtrecke bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 26 \text{ m/s}$ durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine auf den Zylinderdurchmesser bezogene Reynoldszahl von 200000. Bei diesem Wert liegt gerade noch eine laminare Zylinder Grenzschicht vor. Ein an der profilierten Vorderkante der Platte angebrachter Transitionsdraht fixiert den Umschlagspunkt der Plattengrenzschicht. Somit wird die Ausdehnung des sich bildenden Hufeisenwirbelsystems gering gehalten (Baker [1979, 1980]).

Zylinder Geometrie

Durchmesser $D = 120 \text{ mm}$
 Länge $L = 2D$
 Transitionsdraht $x_0 = -1.5D$

Geometrie Endeplatte

$b = 5.833 D$
 $l = 10.833 D$
 $d = 0.15 D$

Strömungsparameter

$Re_D = 200000$
 $U_\infty = 26 \text{ m/s}$
 Turbulenzgrad $Tu = 0.5\%$

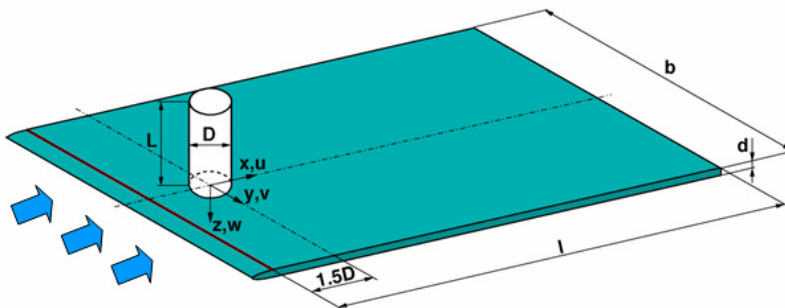


Abb.1 (oben): Skizze des Versuchsaufbaus

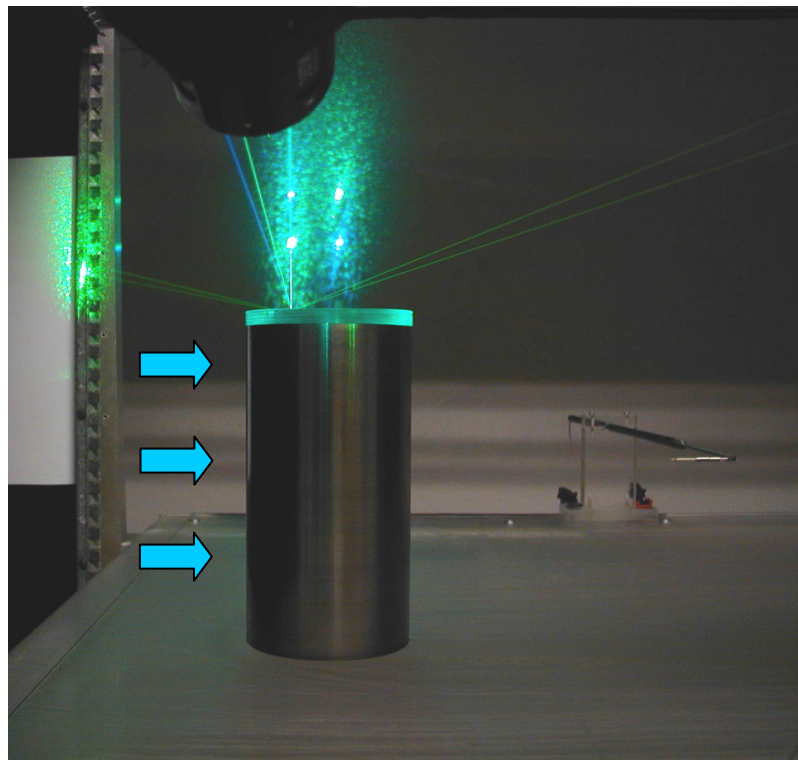


Abb. 2 (rechts): Experimenteller Aufbau im Windkanal (Düse, LDA-Sonde, Hitzdraht)

Im Rahmen der experimentellen Arbeit wird ein drei Komponenten LDA System mit Phasentriggermechanismus verwendet. Das 3C-LDA verwendet einen 500 mW Argon Ionen Laser mit 514nm und 488nm Wellenlänge und einem 100 mW frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser. Dieser Aufbau ermöglicht eine Datenrate von 700-1000 Hz koinzident gemessener Ge-

schwindigkeitsinformationen. Der Triggermechanismus wird über ein Hitzdrahtanemometer realisiert, welches simultan zur Geschwindigkeitsmessung die Ablöseperioden der Primärwirbelstrasse aufnimmt. Das gemessene Signal wird mit Hilfe eines analogen Bandpassfilters vorkonditioniert. Im zweiten Schritt wird aus dem aufbereiteten Hitzdrahtsignal bei Beginn jeder Ablöseperiode ein TTL Puls generiert. Diese Pulse werden von den LDA-Prozessoren zusätzlich aufgezeichnet. So ist es im Postprocessing möglich, jeder koinzident gemessenen Geschwindigkeitsinformation einen Phasenwinkel zuzuordnen und anschließend eine Phasenmittelung durchzuführen. Detaillierte Information zu dieser Methode sind in Leder & Geropp [1988] zu finden. Brede & Leder [2002] wendeten diese Methode bereits erfolgreich auf die Umströmung eines Kreiszyinders mit großem Längen- Durchmesser-Verhältnis an. Die Position des Hitzdrahtsensors liegt bei $x/D = 2.4$ und $y/D = -1.2$.

Ergebnisse

Ein in der Literatur viel diskutierter Punkt bei der Umströmung eines Kreiszyinders mit großem Streckungsverhältnis und zwei begrenzenden Endscheiben sind die im Nachlauf auftretenden periodischen Wirbelablösungen. Als Ursache hierfür sind laut Zdravkovich [1997] Scherschichtinstabilitäten zu nennen. Im weiteren Nachlauf entwickelt sich in Abhängigkeit von der Reynoldszahl eine charakteristische Wirbelstrasse, die Kármánsche Wirbelstrasse. Für die Umströmung eines Kreiszyinders bei einer Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = 2 \cdot 10^5$$

gibt Norberg [1994] eine Strouhalzahl von

$$Sr = \frac{f D}{u} = 0.19$$

für die Periodizität der Primärwirbelablösungen an.

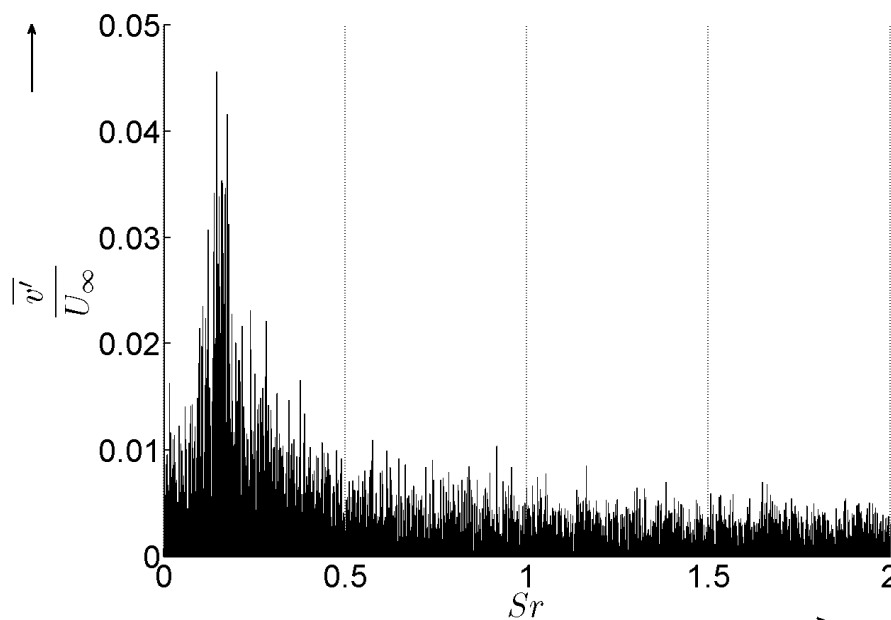


Abb. 3: Spektrum der Querkomponente der Geschwindigkeit im Nachlauf des einseitig begrenzten Kreiszyylinderstumpfes, $x/D = 2,225$; $y/D = 0,7$; $z/D = -0,5$

Für die Umströmung eines einseitig begrenzten Kreiszyylinderstumpfes zeigen sich im zugehörigen Spektrum (Abb. 3.) Unterschiede zur Umströmung eines beidseitig begrenzten Kreiszyinders mit großem Streckungsverhältnis. Die dominanten spektralen Anteile sind we-

niger stark ausgeprägt und im Bereich des Maximums verbreitert sich der Peak. Der Grund hierfür ist der stark drei dimensional geprägte Nachlauf. Das sich am frei Überströmten Zylinderende ausbildende Kopfwirbelpaar und die freie Scherschicht interagieren aufgrund der Kopfüberströmung in komplexer Weise mit den sich aufrollenden Kármán-Wirbeln. Ein detaillierter Überblick über die zeitgemittelte Strömungstopologie ist in Frederich [2007] zu finden. Ein weiterer Unterschied zum Kreiszyylinder mit großem Streckungsverhältnis ist die dominant auftretende Frequenz der seitlich an den Zylinderflanken ablösenden Scherschichten. Abb. 3 zeigt einen Peak bei einer Strouhalzahl von circa 0.15 für die Querkomponente v' . Dieses Ergebnis fügt sich gut in die Zusammenfassung von Sumner et al. [2004] ein.

In diesem Zusammenhang sind die Ergebnisse der phasengemittelten LDA zu sehen, welche bei dieser Frequenz ensembled gemittelt sind. Dies bedeutet, dass die Dynamik der Strömung mit dieser spektralen Komponente und deren Harmonische analysiert werden können. Die gemessenen Geschwindigkeitsinformationen sind hierbei in 16 Phasenwinkel eingeteilt über welche die Phasenmittelung ausgeführt wird. Jedem Phasenwinkel liegt hierbei eine Statistik von 1000 bis 3000 gültig gemessenen Geschwindigkeitsinformationen zu Grunde.

Abb. 4. zeigt das λ_2 Wirbelkriterium als Isofläche zu unterschiedlichen Phasenwinkeln. Eine komplette Phase stellt den gesamten Ablösezyklus der Primärwirbel dar. Es ist deutlich die zeitliche Abhängigkeit der Wirbelformationen zu erkennen. Im endscheibennahen Bereich sind die sich periodisch aufrollenden Primärwirbel mit der zur z-Achse parallelen Drehachse zusehen. Diese bewegen sich konvektiv mit der Hauptströmung und haben einen entgegen gesetzten Drehsinn. Im Bereich des Wiederanlegens der freien Scherschicht aufgrund der Kopfüberströmung (bei $x/D = 2.2$) lösen sich die aufgerollten Scherschichten von der Endscheibe. Die Drehachse verlagert im zeitlichen Verlauf ihre Richtung derart, dass sie anschließend parallel zur Hauptströmungsrichtung verläuft. Sie gehen somit wechselseitig, periodisch und mit entgegen gesetztem Drehsinn in die Längswirbel über. Kopfwirbel und Rezirkulationswirbel aufgrund der Überströmung des freien Zylinderendes zeigen keine Variation bezüglich der Ablösefrequenz bei Strouhalzahl 0.15. Das gleiche gilt für die Wirbeltopologie im Bereich des freien Zylinderendes. Das bedeutet, dass deren Dynamik sich in einem anderen spektralen Bereich abspielen muss und von der Triggerung im Nachlauf nicht erfasst wird. Diese Strukturen zeigen somit keine Interaktion mit den sich periodisch ablösen und aufrollenden Scherschichten. Die Struktur und Verteilung der λ_2 Wirbelkerne zeigt hierbei keine Abweichung vom zeitlichen Mittel. Ausgenommen hiervon ist das im Bodenbereich befindliche Hufeisenwirbelsystem, welches aufgrund der kleinen räumlichen Ausdehnung im Rahmen dieser Messreihe nicht aufgelöst wurde.

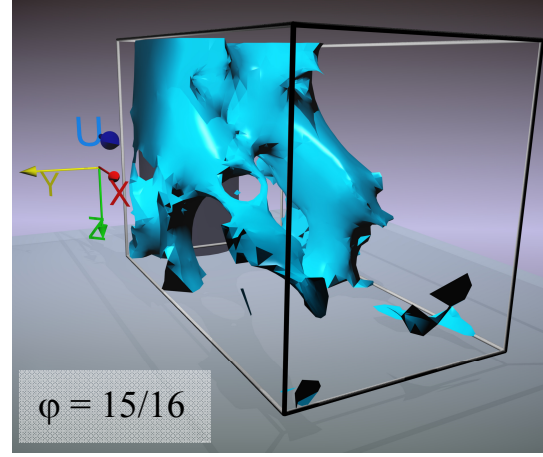
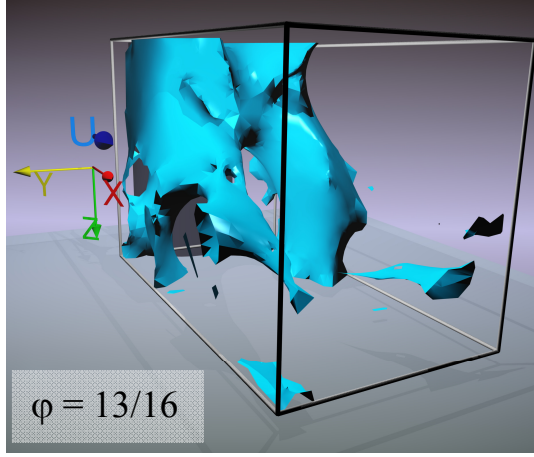
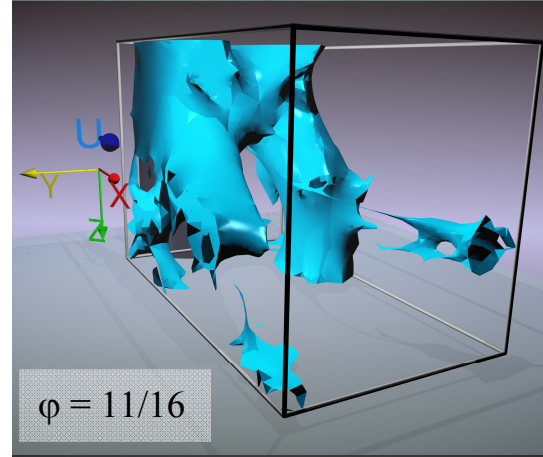
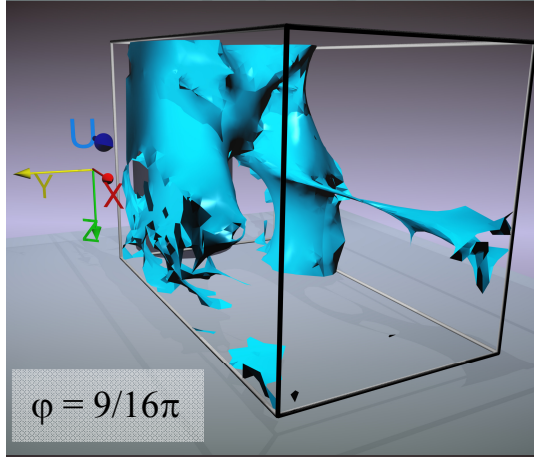
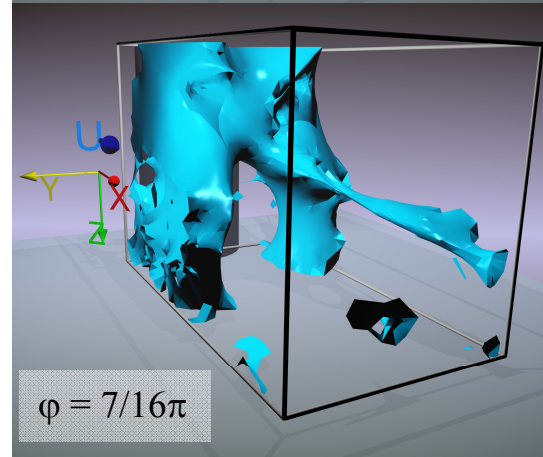
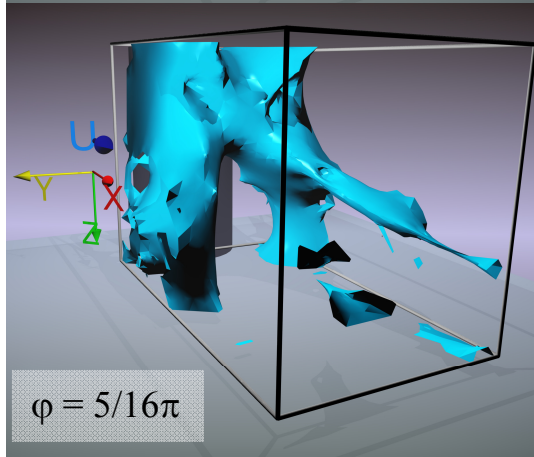
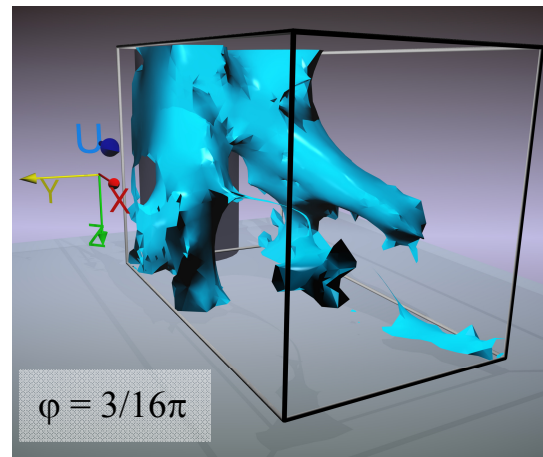
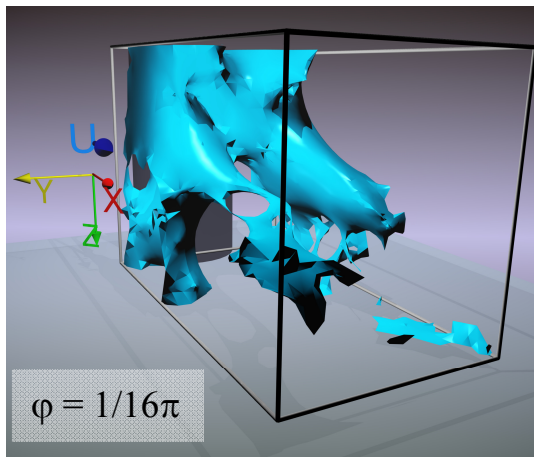


Abb. 4: zeitliche Entwicklung der λ_2 Wirbelstrukturen im Nachlauf des Kreiszyylinderstumpfs, dargestellt

in 8 von 16 Phasenbildern, getriggert auf die Primärwirbelstrasse bei einer Reynoldszahl von 200000

Eine Analyse des Zeitschritts $\varphi = 13/16\pi$ in Abb. 5 lässt einen detaillierten Blick in die Dynamik der Strömung zu. Dargestellt ist die Wirbeleinhüllende $\lambda_2 = -0.25$ Isofläche. Zusätzlich wird das phasengemittelte, dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld in den Strukturen durch instantane Stromlinien verdeutlicht. Die Primärwirbel im Strömungsfeld sind mit a und b gekennzeichnet. Im Kern von Primärwirbel a ist klar ein Tornado-ähnliches Verhalten mit einer starken Geschwindigkeitskomponente in Richtung des freien Zylinderendes und einer negativen Drehung bezüglich der z-Achse zu erkennen. Die Drehachse der Struktur liegt im endscheibennahen Bereich parallel zur z-Achse und verlagert sich im Bereich des freien Zylinderendes um 90° . Sie liegt in diesem Bereich parallel zur y-Achse. Hier wird die Verbindung der aufgerollten Scherschichten in Form eines Bogenwirbels deutlich. Struktur b stellt die Gegenseite der seitlich, wechselseitig ablösenden Wirbelstruktur a dar, welche in diesem Fall durch die Hauptströmung konvektiv stromab getragen wurde. Der Wirbel ist im Bodenbereich weiterhin durch eine starke positive Rotation bezüglich der z-Achse geprägt. Im Vergleich zu a ist im Kern jedoch eine starke Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Endscheibe zu erkennen. Durch den Fluidtransport in Richtung Endscheibe weitet sich die Struktur im Fußbereich auf und löst vom Boden ab, wobei der Drehimpuls erhalten bleibt. Lediglich die Drehachse verlagert sich hierbei um 90° und verläuft dann parallel zur x-Achse. Verdeutlicht wird dies durch die Strukturen c und d, welche in Form von Längswirbel auftreten. Im zeitlichen Verlauf lösen sich die Längswirbel von den restlichen Strukturen des Nachlaufs und werden stabil um die x-Achse rotierend konvektiv stromab getragen.

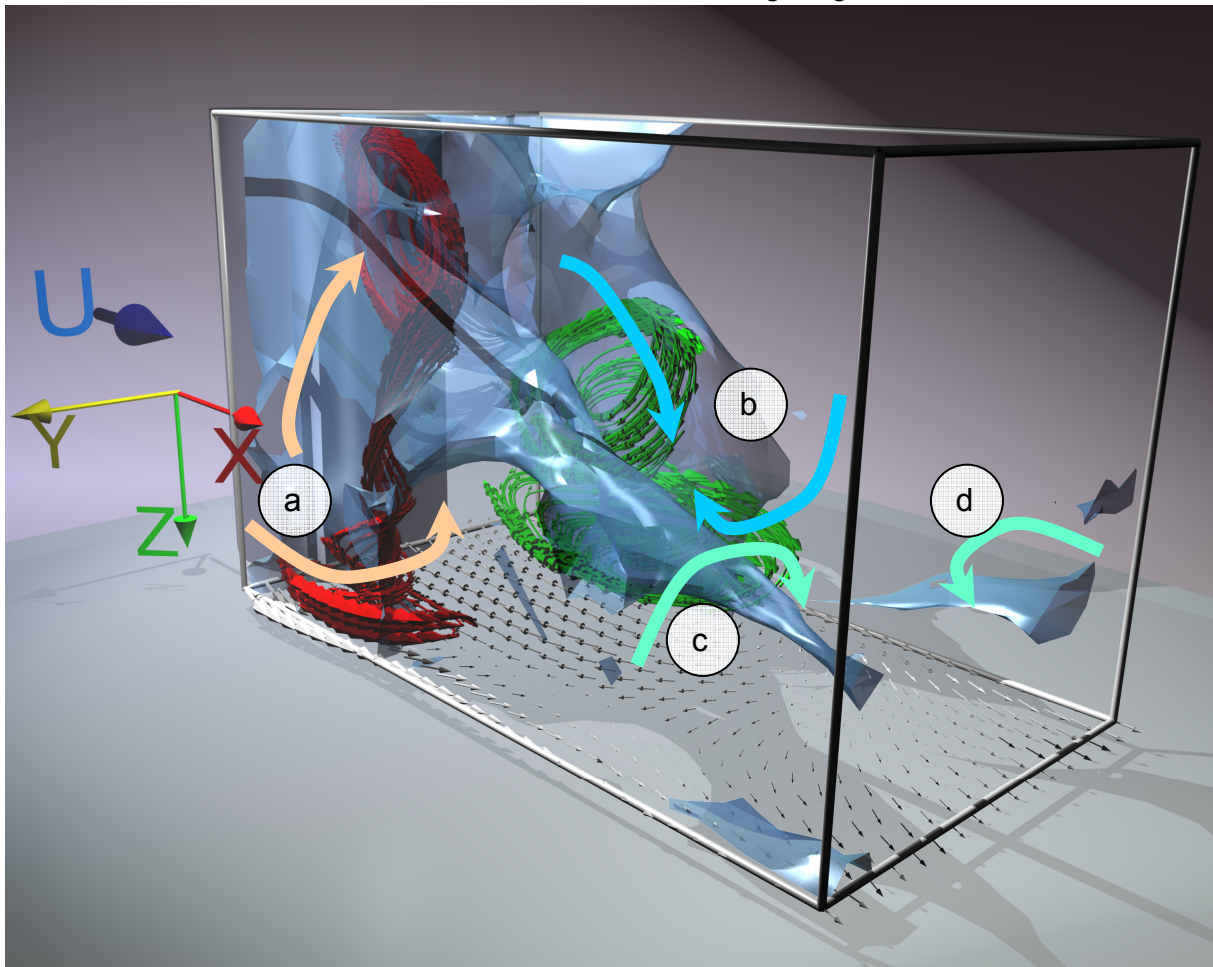


Abb. 5: Phasengemittelte Wirbelstruktur dargestellt durch λ_2 Wirbeleinhüllende zum Zeitpunkt $\varphi = 13/16\pi$

Zusammenfassung

Es wurden phasengemittelte LDA Messungen im Nachlauf eines einseitig begrenzten Zylinderstumpfs durchgeführt. Getriggert wurde auf die Frequenz der Primärwirbelstrasse im Nachlauf. Die Geschwindigkeitsinformationen wurden in 16 Phasenensembles eingeteilt und gemittelt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen die komplexen Wechselwirkungen der primären Wirbelstrasse mit den übrigen Strukturen im zylindernahen Nachlauf. Aus diesem Zusammenhang wurde eine instationäre Wirbeltopologie erstellt, welche auf die zeitliche Entwicklung der Primärwirbel und deren Verbindung in Form eines Bogenwirbels eingeht. Darüber hinaus wurde der periodische Übergang in Längswirbel beschrieben, welcher ebenfalls bei einer Strouhalzahl von 0.15 stattfindet. Die spektrale Komponente der Primärwirbel ordnet sich gut in die vorhandene Literatur ein. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Dynamik der restlichen Strukturen im Nachlauf und im Bereich des frei überströmten Zylinderendes nicht bei der Frequenz der Primärwirbel, beziehungsweise deren Harmonische, abläuft.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren in der Strömungsmesstechnik“.

Literatur

- Baker, C. J. (1979) The laminar horseshoe vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 95 part 2, pp. 347-367
- Baker, C. J. (1980) The turbulent horseshoe vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 6 pp. 9-23
- Brede, M., Leder, A. (2002) On the structure of turbulence in the transitional cylinder wake. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III, Notes Numer. Fluid Mech.* 77. pp.189 - 196, (ISBN 3-540-42696-5)
- Frederich, O., Scouten, J., Luchtenburg, M., Thiele, F., Jensch, M., Hüttmann, F., Brede, M., Leder, A. (2007) Joint numerical and experimental investigation of the flow around a finite wall-mounted cylinder at a Reynoldsnumber of 200 000. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. Vol. 96, pp. 348-345
- Jensch, M., Brede, M., Richter, F., Leder, A. (2006) Verwendung des Time-Resolved Stereo-PIV Messsystems zur Ermittlung zeitaufgelöster Geschwindigkeitsfelder im Nachlauf eines Kreiszyinders. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006*. PTB Braunschweig, S. 39.1-39.8, (ISBN 3-9805613-3-X)
- Jensch, M., Brede, M., Hüttmann, F., Leder, A., Frederich, O., Wassen, E., Thiele, F. (2007) Time-Resolved Stereo-PIV Messungen im Kopfbereich und Nachlauf eines Kreiszyylinderstumpfes. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 15. Fachtagung der GALA e.V. 2007*. Uni Rostock, Rostock, S. 19.1 – 19.7
- Jeong, J., Hussain, F. (1995) On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol 285, pp. 69-94
- Leder, A., Geropp, D. (1988) Phase-averaged LDA measurements in turbulent separated flows. Durão, D.F.G. (Editor): *Proceedings of the fourth International Symposium on Applications of Laser-Anemometry to Fluid Mechanics*. Lissabon, Portugal, paper 3.3
- Leder, A. (2003) 3D-flow structures behind truncated circular cylinders. *Proceedings of FEDSM'03, Fourth ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference*. Honolulu, USA, FEDSM2003-45083
- Norberg, C. (1994) An experimental investigation of the flow around a circular cylinder : influence of aspect ratio. *Journal of Fluid Mechanic*. Vol. 258, pp . 287-316
- Oschatz, L.-G., Richter, F, Leder A. (2002) 3D-Laser-Dopplermessungen im Kopf- und Fußbereich eines Zylinderstumpfes. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 10. Fachtagung der GALA e.V. Universität Rostock*, S. 24.1-24.6, (ISBN 3-86-009-233-2)

- Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Zhang, X. (2005) Measurement of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plate. *Experiments in Fluids*, Vol.39, pp. 10-21.
- Richter, F., Leder, A., 2005: "Wirbelstrukturen und Kraftwirkungen am Kreiszyylinder in Scherströmungen", *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 13. Fachtagung der GALA e.V., Cottbus*, S. 23.1-23.8, (ISBN 3-9805613-2-1)
- Sumner D, Heseltine J, Dansereau O (2004) Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio. *Experiments in Fluids* Vol. 37 pp. 720–730
- Zdravkovich MM (1997) *Flow around circular cylinders, vol 1: fundamentals*. Oxford University Press, Oxford